采用数字图像体相关方法的核级石墨断裂特性研究

沈杰[1],陈红鸟[1],MARROW T J[2]

(1. 贵州大学空间结构研究中心,550025 贵阳;2. 牛津大学材料系,OX1 3PH 牛津 英国)

摘　要: 为研究核工程备选石墨(SNG742 细粒石墨)的断裂性能,探明材料的三维断裂力学特性,对压缩双裂纹圆孔板(DCDC)试件进行压缩试验,使用 X 射线计算机断层扫描(XCT)技术对试件内部进行测量。采用数字图像体相关(DVC)方法对 XCT 扫描图像进行分析,获得了 DCDC 试件的三维位移场和应变场。通过对比 DVC 和有限元模型的 x 方向应变场,反演了试件的弹性模量。结果表明,当弹性模量取 10.6 GPa 时,有限元模拟结果与试验结果最接近,二者的最小应变误差约为 0.09×10^{-3}。此外,利用 XCT 图像中裂缝与周围区域灰度差异明显的特点,定量分析了尺度上与主裂缝宽度接近的内部缺陷,整体上受拉区域的缺陷密度高于受压区域的,其平均值大约是受压区域的 2.7 倍。从试件的位移场得到裂缝的三维特征,分析表明:局部裂缝长度沿试件厚度方向呈现内部高、表面低的分布规律,裂缝张开位移与局部裂缝长度成正比,裂尖张开角基本保持不变,约为 1.5°。最后,分析了裂缝前缘处应变,发现应变不随局部裂缝长度的变化而改变,其值始终保持在 5.8×10^{-3} 上下。本研究方法可为通过小尺寸试件获得材料的断裂参数提供思路,研究结果可为研究核级石墨的三维断裂特性提供直接的试验证据。

关键词: 核级石墨;数字图像体相关方法;弹性模量;断裂;X 射线计算机断层扫描

中图分类号: TL341;TQ127.11　**文献标志码:** A

The fracture characteristics of nuclear graphite using digital volume correlation method

SHEN Jie[1],CHEN Hongniao[1],MARROW T J[2]

(1. Space Structure Research Center,Guizhou University,550025 Guiyang,China;
2. Department of Materials,University of Oxford,OX1 3PH,Oxford,UK)

Abstract: In order to study the fracture performance of candidate graphite (SNG742 fine-grained graphite) for nuclear engineering and clarify 3D fracture mechanics of the material, in-situ compressive tests were performed on double cleavage drilled compression (DCDC) specimens. X-ray computed tomography (XCT) technique was used to scan the specimen and digital volume correlation (DVC) method was further applied to analyze the scanned images to obtain 3D displacement and strain fields of the specimen. Elastic modulus was determined inversely by minimizing the strain discrepancy between the DVC results and finite element results. When the elastic modulus of the model was 10.6 GPa, the discrepancy was the mini-

收稿日期: 2022-02-21　　**修回日期:** 2022-05-25
基金项目: 国家留学基金资助出国留学项目(No. 201906675001);贵州省科技计划重点项目(黔科合基础-ZK[2022]重点 007)
通信作者: 陈红鸟,教授。E-mail:hqchen@gzu.edu.cn
引用格式: 沈杰,陈红鸟,MARROW T J,等. 采用数字图像体相关方法的核级石墨断裂特性研究[J]. 应用力学学报,2023,40(1):171-178.
SHEN Jie,CHEN Hongniao,MARROW T J,et al. The fracture characteristics of nuclear graphite using digital volume correlation method[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(1):171-178.

mum and the minimum error was 0.09×10^{-3}. In addition, based on the gray difference between the crack and the surrounding area in XCT images, the internal defects comparable to the main crack in scale were evaluated quantitatively. Generally, the defect density in the tension area was higher than that in the compression area and its average was about 2.7 times of that in the compression area. From the 3D characteristics of the crack obtained from the displacement field, it was found that along the thickness direction, the local crack length was higher near the middle and lower near the surface, the crack opening displacement was directly proportional to the local crack length, and the crack tip opening angle remains basically unchanged, about 1.5°. Finally, the strains at the crack front were analyzed. It was found that the strains did not change with the local crack length and kept around 5.8×10^{-3}. The study method can provide some ideas for obtaining the fracture parameters of materials through small-sized specimens and the results can provide direct experimental evidence for understanding the 3D fracture characteristics of nuclear graphite.
Key words: nuclear graphite; digital volume correlation; elastic modulus; fracture; XCT

核级石墨具有中子慢化能力好、耐高温、耐辐射等特性,被广泛应用于高温气冷堆(high temperature gas cooled reactor, HTGR)中,成为 HTGR 的关键材料[1-3]。HTGR 中核级石墨除了充当中子慢化剂以外,还用作堆芯结构材料容纳堆内的石墨燃料球,除承受堆芯上部及构件本身的重力和地震作用,在反应堆运行时还将承受机械荷载、热应力、辐射应力等[4]。在复杂的应力作用下,石墨构件可能会产生裂纹,进而威胁到 HTGR 的安全[5]。为此,各国学者对石墨的断裂性能进行了大量的研究[6-9]。其中,石墨的弹性模量对于评估其断裂韧性非常重要。对于大多数材料来说,弹性模量是一个常数,仅随温度变化,容易测量。然而,由于石墨受核反应堆中复杂应力的影响,其内部的微观结构发生变化,弹性模量也随之改变[10]。因此,使用断裂试验中的同一试件来评估石墨的弹性模量是必要的。

数字图像体相关(digital volume correlation, DVC)方法是从数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法上发展而来的,在测量材料内部变形方面具有明显的优势[11]。在 X 射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography, XCT)中,材料微观结构的不均匀(如孔隙、夹杂物等)会引起 X 射线的衰减差异,使得射线照片拥有足够的对比度,从而能使断层扫描图像重建为三维图像[12-13]。1999 年,BAY 等[14]将数字图像相关方法由二维引向三维并发展为 DVC 方法。刘帅等[11]利用 DVC 方法计算了打印铝合金试样的弹性模量,得到的结果与常规力学测量结果吻合。各国学者利用 DVC 方法研究了核石墨的断裂特性[15-16]。

压缩双裂纹圆孔板(double cleavage drilled compression, DCDC)是一种适合 Ⅰ 型裂纹稳定扩展的小尺寸试件,于 1977 年由 JANSSEN 首次提出,并用于研究玻璃材料[17]。试件为长方体,中心钻有一个圆孔,在其承受轴向压缩时,由于泊松效应,孔的顶端和末端会产生拉应力,使得孔的两端产生沿轴向稳定扩展的裂缝[18-19]。

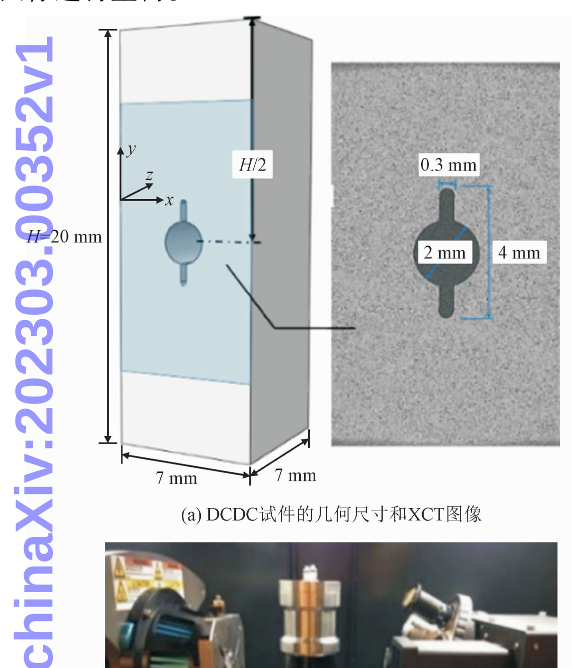
有限元模型修正方法(finite element model updating, FEMU)是一种反推材料参数的方法[20-21]。该方法在试验的基础上建立同等边界条件的有限元模型,通过不断更新迭代模型中的力学参数,以缩小试验结果与数值结果的差距;当二者差距最小时,便可得到最接近材料本身的力学参数。吴佳宁等[21]将数字散斑相关方法与 FEMU 相结合,反推了岩石的弹性模量和泊松比。LIU 等[20]提出了一种基于数字图像相关方法、FEMU 和人工神经网络的混合识别方法,评估了 IG11 核级石墨在复杂应力状态下的损伤演化。

本研究通过对 DCDC 石墨试件进行原位试验,利用 XCT 技术对试件内部进行实时观测,采用 DVC 方法对 XCT 扫描图像进行分析,获得了 DCDC 试件的三维位移场和应变场。通过对比试验结果和有限元模拟结果,反推了试件的弹性模量,并分析了误差来源。此外,通过分析 XCT 扫描图像,研究了裂缝周围缺陷的分布规律,得到了裂缝的长度及宽度。最后,通过分析 DVC 三维位移场,获得了裂缝的三维特征以及裂缝前缘应变。

1 材料与试验介绍

材料选用下一代核能候选材料细粒石墨

SNG742（粒度为 20 μm），由中国中钢集团生产。石墨试件采用压缩双裂纹圆孔板（DCDC），试件尺寸为 7 mm × 20 mm × 7 mm（$x \times y \times z$），中心钻有直径为 2 mm 圆孔，并在圆孔两端沿中心轴做长 1 mm、宽 0.3 mm 的缺口，如图 1（a）所示。使用 Deben CT5000 加载装置，对石墨试件施加单轴压缩载荷，如图 1（b）所示。分别在荷载 P ＝20 N，P ＝1 116 N 和 P ＝2 000 N时对石墨试件进行断层扫描，对应试件的预加载阶段、未开裂阶段和裂缝扩展阶段。每次扫描都是在旋转 360°的情况下通过 1 601 个射线投影获得，断层图像共有 2 008 × 2 020 像素，有效像素尺寸为5.81 μm。最后使用 Zeiss 扫描软件对断层图像进行重构。



(a) DCDC试件的几何尺寸和XCT图像

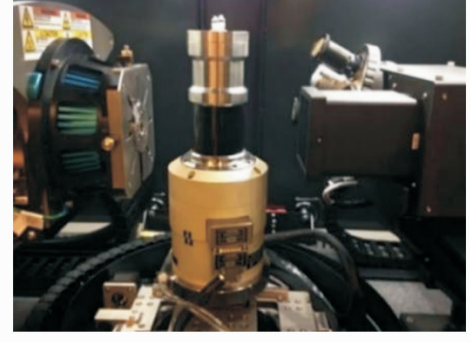

(b) 压缩试验装置：X射线源(左)、Deben CT5000加载装置(中间)和探测器(右)

图 1　实验模型及装置

Fig. 1　Experimental model and device

2　分析方法

2.1　DVC 分析

使用 LaVision DaVis 软件（版本 8.4.0）进行 DVC 分析，以预加载 P ＝20 N 状态下的 XCT 图像作为参考图像，分析未开裂阶段（P ＝1 116 N）和开裂阶段（P ＝2 000 N）的变形。分析过程如图 2 所示，将 XCT 图像尺寸裁剪为 1 200 × 664 × 1 144 个像素，对应分析区域大小为 6.97 mm × 3.86 mm × 6.65 mm。为确保位移场连续性，减少 XCT 图像中可能存在的噪点影响，分析子集大小采用 64 × 64 × 64 个像素，子集间的重叠率为 75%，分析区域共有子集 75 × 41 × 72 个。通过参数分析发现，在保持其余参数不变的提前下，改变子集大小对 DVC 分析结果影响很小，在非应力集中区域，使用不同大小的子集分析，试件两侧横向位移的标准差仅为 ± 0.09 μm。

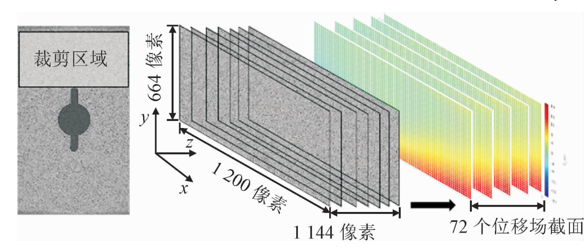


图 2　XCT 图像裁剪区域及 DVC 分析示意图

Fig. 2　Clipping area of XCT images and schematic diagram of DVC analysis

为了把 DVC 分析得到的位移场转换为应变场，将 DVC 数据中每 8 个相邻节点作为一个集合，并根据拉格朗日插值函数对集合进行插值，得到位移函数 $U(x,y,z)$，如图 3 所示。最后，通过对位移函数求偏导，即可得到各个方向的应变场。

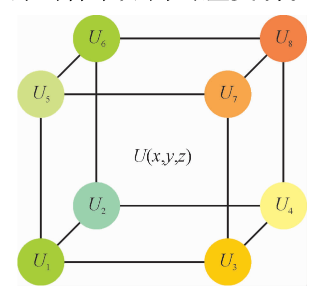


图 3　8 节点位移函数示意图

Fig. 3　Displacement function constructed by 8 nodes

2.2　反推弹性模量方法

为了得到材料的弹性模量，首先建立与 DCDC 试件尺寸相同的三维有限元模型（finite element modeling，FEM），如图 4 所示。FEM 中，材料为泊松比 0.2 的均质材料，单元选用三维八节点单元（C3D8R），整个模型共有单元 38 320 个、节点 44 143 个，为保证分析区域内单元密度统一，该区域内单元呈 0.1 mm 等间距分布。固定模型下端 y 方向位移，

并对上端施加 $P=1\ 116$ N 的均布荷载。模型计算完成后，截取相同区域的模拟结果与 DVC 分析结果作对比。

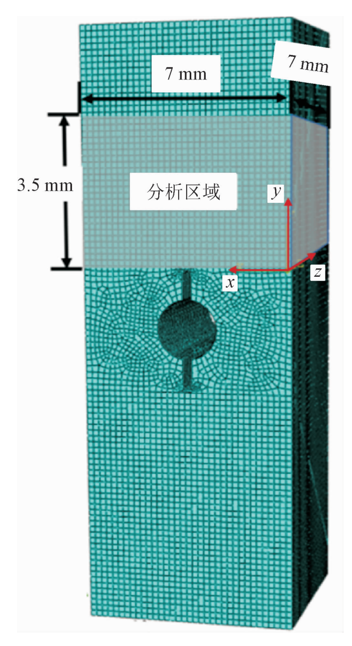


图 4　有限元模型网格和分析区域

Fig. 4　Finite element mesh and analysis regionthe same as DVC

为方便 DVC 和 FEM 结果的比较，基于 DVC 实测应变场，在与 FEM 的单元积分点对应的位置使用 3 次样条插值方法进行插值，使得 DVC 实测数据和 FEM 数据一一对应。为衡量 FEM 值与 DVC 实测结果之间差异，建立目标函数 Q，即

$$Q = \sum_{i=1}^{n} [\varepsilon_x^{\mathrm{FEM}} - \varepsilon_x^{\mathrm{DVC}}]^2 \qquad (1)$$

其中：$\varepsilon_x^{\mathrm{FEM}}$ 为 FEM 得到的 x 方向应变；$\varepsilon_x^{\mathrm{DVC}}$ 为 DVC 实测 x 方向应变；n 为单元数量；i 为单元编号。

将不同弹性模量的 FEM 应变代入到式(1)中，与 DVC 实测结果作对比，当目标函数结果最小时，就认为该弹性模量是最接近材料本身的，从而反推出试件的弹性模量。

3　结果分析与讨论

3.1　弹性模量反推结果及误差分析

为了降低忽略石墨非线性本构所带来的误差，选择非损伤区域来反推弹性模量，将石墨抗拉强度 $\sigma_t=27$ MPa 除以弹性模量后的三分之一作为判断损伤区域的应变阈值[22]。参考 IG11 核级石墨的材料属性[2]，弹性模量假设为 11 GPa，因此将 0.81×10^{-3} 作为应变阈值判断损伤区域。如图 5 所示，超过应变阈值的区域以深红色表示，该区域的结果在后续分析中不用于反推弹性模量。

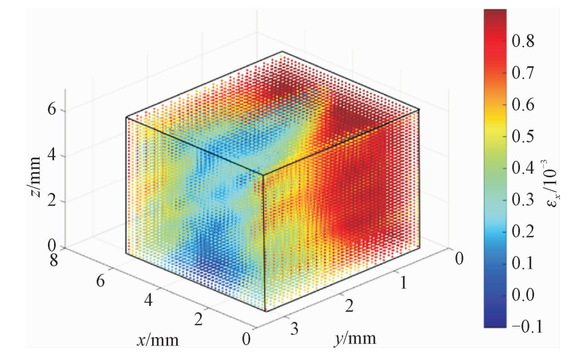


图 5　未开裂阶段的 DVC 实测三维应变场

Fig. 5　3D strain field measured by DVC in uncracked stage

将不同弹性模量下的 FEM 和 DVC 的 x 方向应变全部代入式(1)，计算目标函数 Q，计算结果与弹性模量 E 的关系如图 6 所示。可以看出，当 $E=10.6$ GPa时，目标函数 Q 最小，因此认为材料的弹性模量 $E=10.6$ GPa。该结果略高于考虑损伤区域的 $E=10$ GPa[23]，与报道的 11 GPa 接近[24]。当 FEM 的弹性模量取 10.6 GPa 时，FEM 与 DVC 之间 x 方向应变误差的平均值为$(0.09\pm0.06)\times10^{-3}$。

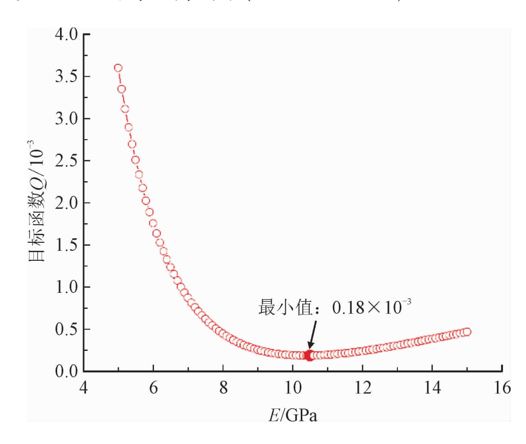
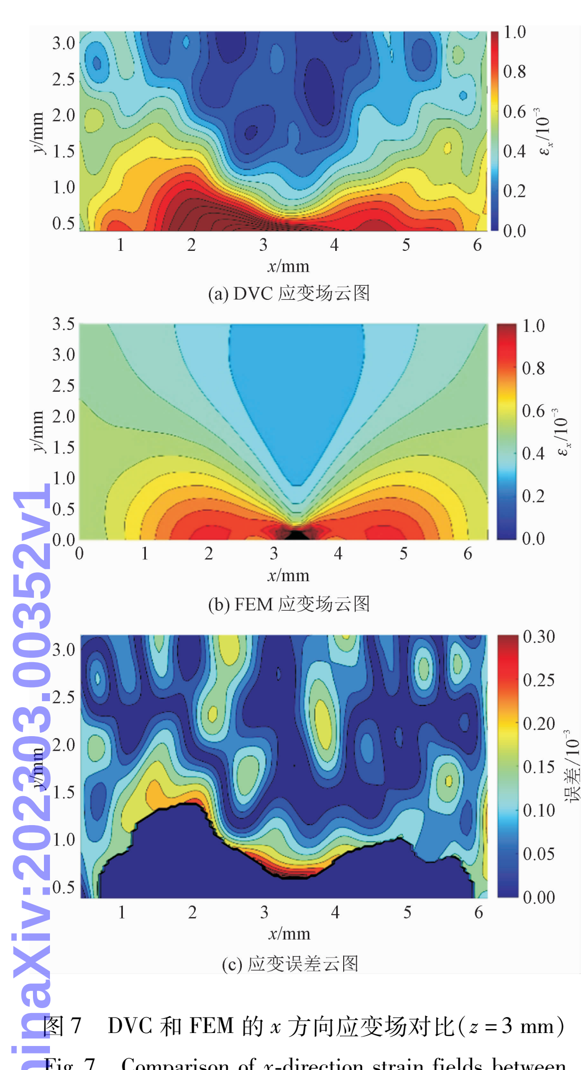


图 6　不同弹性模量下的目标函数

Fig. 6　Objective function under different elastic modulus

为分析以上反推方法的误差来源，以试件截面 $z=3$ mm 为例(坐标原点见图 1a)，分别生成 DVC 和 FEM 的 x 方向应变场云图，如图 7(a,b)所示。对比两者的应变云图发现，DVC 应变场的等值线连续性比 FEM 结果差，这是由于石墨材料不同于 FEM 中假定的均质材料，本身含有不均匀且随机的孔隙[25]。在非损伤区域($\varepsilon_x<0.81\times10^{-3}$)将两者的应变场相减取绝对值，得到 DVC 与 FEM 间的误差云图，如图 7(c)所示。可以看出，误差主要存在于预制缺口前端的应变集中区域和局部的等值线间断

区域，试件的尺寸公差、材料的初始缺陷以及荷载的偏心都可能是误差产生的原因。



(a) DVC 应变场云图

(b) FEM 应变场云图

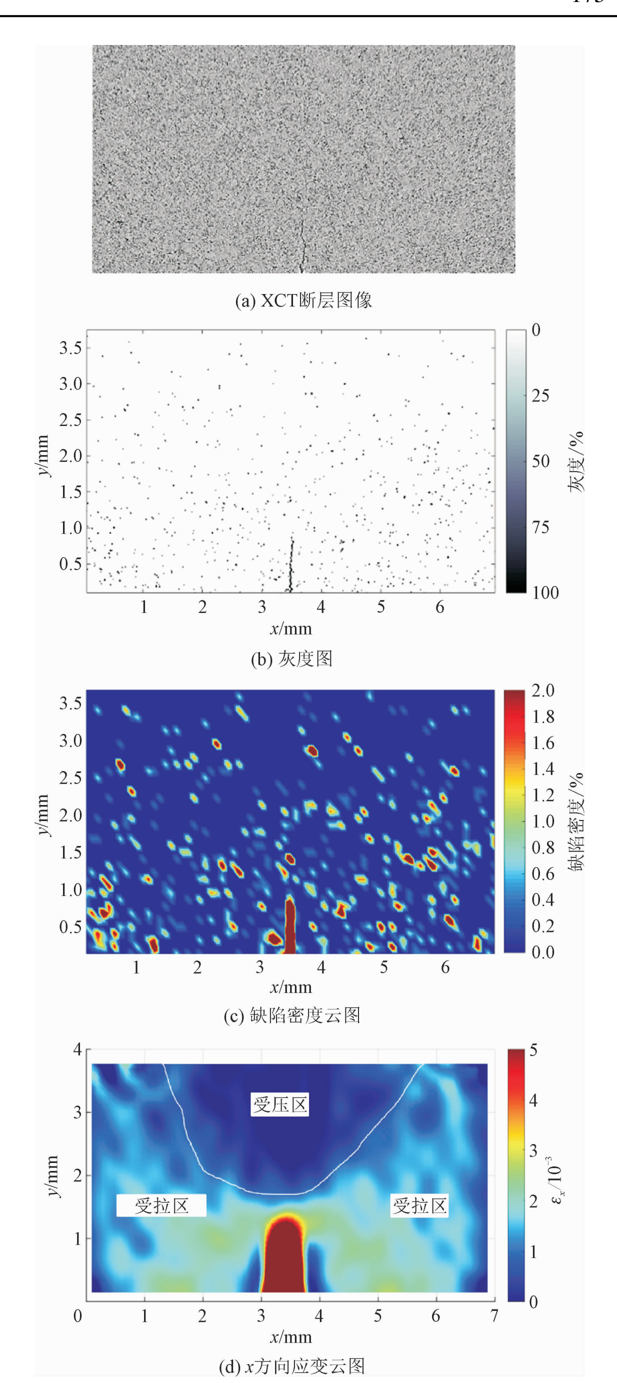
(c) 应变误差云图

图 7 DVC 和 FEM 的 x 方向应变场对比($z=3$ mm)

Fig. 7 Comparison of x-direction strain fields between DVC and FEM ($z=3$ mm)

3.2 基于 XCT 断层图像的缺陷分析

以裂缝阶段($P=2\,000$ N)的 $z=0.3$ mm 处的断层图像为例，当把图像中灰度值小于 95% 的区域全部隐藏时，可以清楚地看到主裂缝的形状以及周围的缺陷，如图 8(a,b)所示。这些缺陷主要来源于试件中的较大孔隙和受荷载作用所产生的微裂纹，它们在尺度上与主裂缝宽度接近。从图 8(b)中还可以发现，这些缺陷并不是均匀分布，而是呈现出裂缝周围更加密集的现象。为了对图中缺陷所占面积进行定量分析，以 DVC 的子集大小为单位，计算每个子集区域内缺陷所占面积的百分比，以云图的形式展示出来，并将其与对应的应变云图作对照，如图 8(c,d)所示。



(a) XCT断层图像

(b) 灰度图

(c) 缺陷密度云图

(d) x方向应变云图

图 8 XCT 断层图像($z=0.3$ mm)分析

Fig. 8 XCT tomographic images analysis ($z=0.3$ mm)

结果表明，相比于受压区域，受拉区域的缺陷密度更高，其平均值是受压区域的 2.7 倍。说明拉应力使得试件中原本存在的缺陷得到发展。

3.3 三维裂缝特征分析

为了从断层图像中直接测量到裂缝长度，使用数字图像技术来对断层图像进行处理。考虑到主裂纹近似为直线，其余区域均为散点，采用霍夫变换直线检测来对 1 144 张断层图像中的主裂缝进行测量，

并拟合检测结果,得到图 9。由图 9 可以看出,局部裂缝长度沿厚度方向变化,且呈现出内部高,靠近试件表面低的趋势。此外,检测结果始终存在约 ±0.1 mm的波动,这是由于裂缝尖端张开位移太小,仅凭灰度差异不能很好地将裂缝尖端与周围的缺陷区分出来。

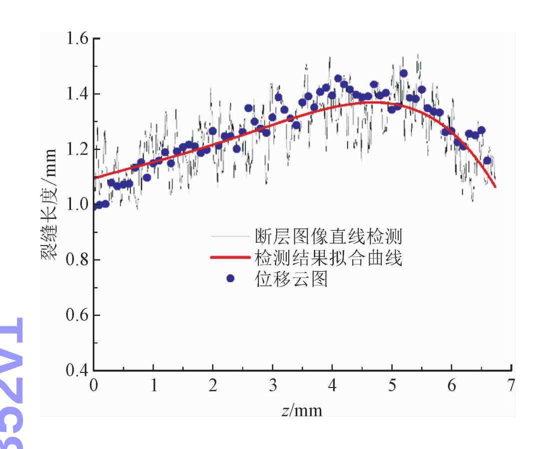


图 9　沿厚度方向的裂缝长度

Fig. 9　Crack length along the thickness direction

将 $z=0.3$ mm 截面处的 x 方向位移场以三维曲面形式表示,如图 10(a)所示。可以看出,受裂缝扩展的影响,预制缺口前端($x=3.5$ mm)的水平位移相反且出现明显的跃变,将跃变区域长度看作是该截面的局部裂缝长度,跃变高度看作是裂缝张开位移(crack opening displacement,COD)。按照此方法,沿试件厚度方向,将所有截面的局部裂缝长度以散点的方式放入图 9 中,可以发现,裂缝长度始终围绕检测结果的拟合曲线上下波动,两者具有较高的一致性,说明 DVC 方法得到的位移场可真实反映试件内部裂缝的扩展情况。

同理,根据位移场曲面的跃变高度,得到沿试件厚度方向变化的 COD,如图 10(b)所示。将不同截面的 COD 投影到一个平面上,得到图 10(c)。可以看出,COD 曲线沿试件厚度并不相同,并且呈现出局部裂缝越长,COD 越大的现象。其中,裂缝口张开位移(crack mouth opening displacement,CMOD)与局部裂缝长度的关系如图 10(c)中的右上角所示,可以看到,CMOD 的波动范围在 20~28 μm 之间,呈现随局部裂缝长度线性增长的趋势。此外,利用 XCT 图像中裂缝与周围区域灰度差异明显的特点,直接从 XCT 图像确定裂缝开口处的裂缝张开位移,大约在 3~5 个像素之间,对应的尺寸为 18~29 μm,这与从 DVC 位移场得到的 CMOD 基本一致。

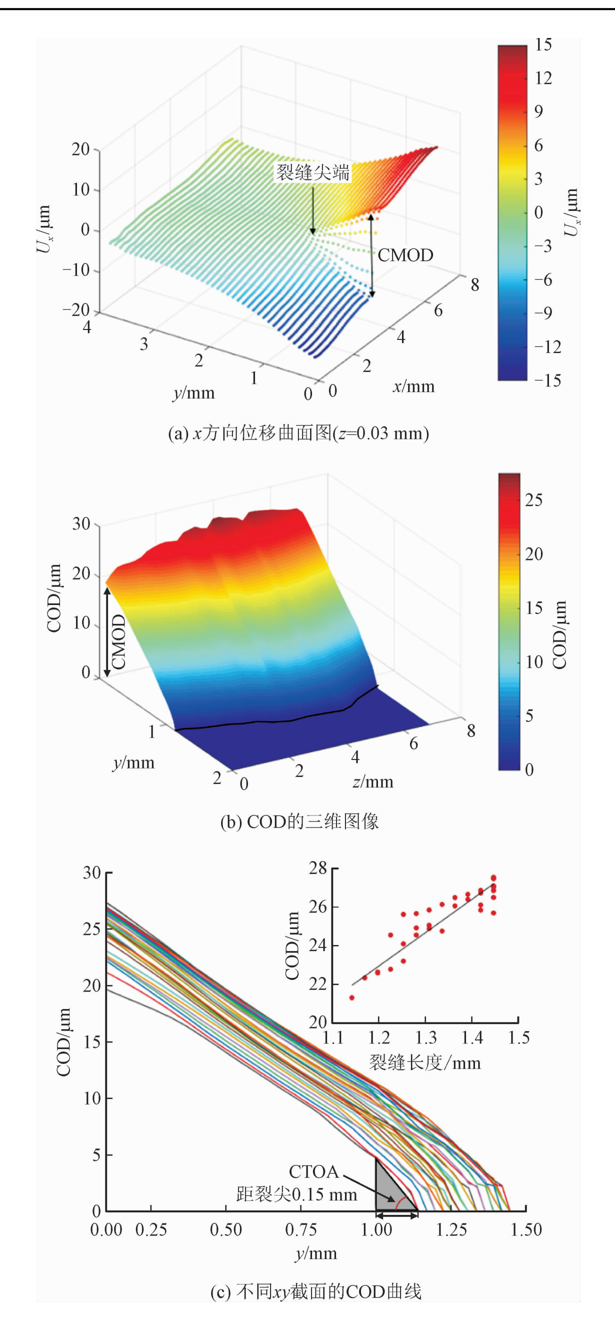


图 10　裂缝特征分析

Fig. 10　Crack characteristic analysis

此外,在图 10(c)中,从距离裂尖 0.15 mm 处作 COD 曲线到裂尖的割线,可以得到裂尖张开角度(crack tip opening angle,CTOA),发现 CTOA 沿厚度方向基本不变,大致在 1.5°左右。

3.4　裂缝前缘的应变分析

为了研究裂缝前缘应变沿厚度方向的变化规律,取截面 $x=3.5$ mm 处的应变分布进行分析,并生成沿厚度方向的应变分布,如图 11(a)所示。可以看到,试件内部的应变集中区域比靠近表面处更深

入。将前文测得的裂缝尖端位置放入图11(a)中，可以发现，应变集中区域沿厚度方向的变化规律基本与裂缝前缘形状一致，呈现内部高，表面低的趋势。

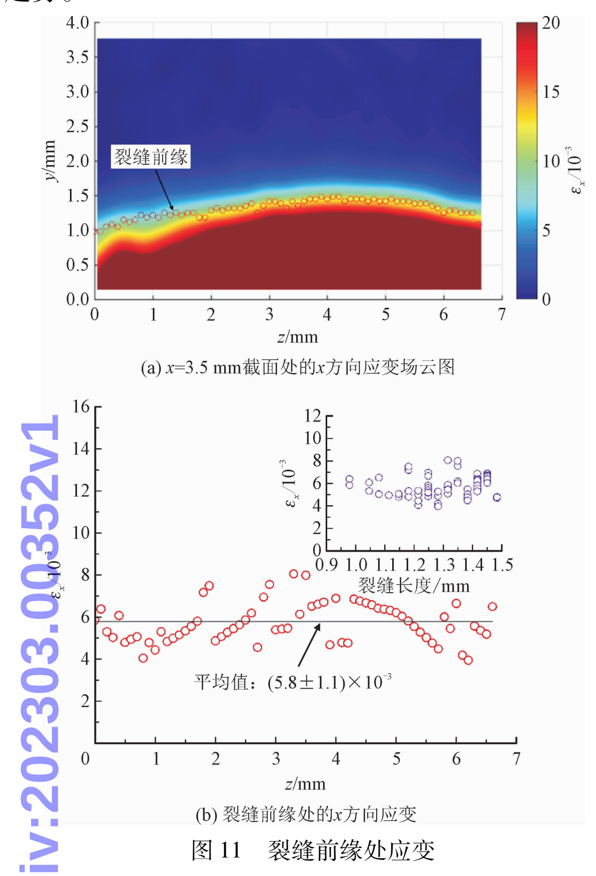


图11 裂缝前缘处应变

Fig. 11 Strains at crack front

测量裂缝前缘处的应变，结果如图11(b)所示。可以看到，裂缝前缘应变围绕平均值5.8×10^{-3}上下波动，标准差为1.1×10^{-3}。造成波动的原因可能是局部裂缝长度的测量误差，或材料本身的局部差异。从图11(b)的右上角可以发现，裂缝前缘处应变基本不随局部裂缝长度的改变而发生明显变化。因此，应变5.8×10^{-3}可以作为判断SNG742石墨裂缝扩展的阈值，这与文献[26]中所观察到的5×10^{-3}接近。

4 结 论

本研究对DCDC石墨试件进行了原位试验，使用XCT技术对试件内部的微观变形进行扫描，对XCT扫描图像进行三维重构，通过DVC方法分析重构图像，获得试件的三维位移场和应变场。结合有限元分析，对材料的弹性模量、内部缺陷和裂纹特征进行分析，得到如下结论。

1)当弹性模量$E=10.6$ GPa时，DVC的实测应变与FEM的计算应变最接近，两者x方向应变的误差平均值为$(0.09\pm0.06)\times10^{-3}$。

2)试件受拉区域的缺陷密度平均值是受压区域的2.7倍，证实拉应力加剧了材料内部缺陷的发展。

3)裂缝长度沿厚度方向呈现内部高、表面低的分布规律，COD值与局部裂缝长度成正比，CTOA基本保持不变，约为1.5°。

(4)裂缝前缘应变不随局部裂缝长度的变化而发生明显改变，始终在5.8×10^{-3}上下波动，该值可作为判断石墨裂缝扩展的阈值。

致 谢

本研究中石墨原位试验和DVC分析利用牛津大学材料系的设备及工作站完成；在试件准备、CT扫描和DVC分析过程中，同行WU Houzheng(拉夫堡大学)，Daniel Scotson(曼彻斯特大学)和JIN Xiaochao(西安交通大学)均给予了帮助，在此一并感谢！

参考文献：

[1] 胡玉琴，孙立斌，王洪涛，等. 高温气冷堆工程验证用国产石墨的强度实验研究[J]. 科技导报，2012，30(21)：45-50.
HU Yuqin，SUN Libin，WANG Hongtao，et al. Domestic graphite strength test for HTR engineering verification[J]. Science & technology review，2012，30(21)：45-50(in Chinese).

[2] 陈红鸟，苏启亮，陈靖，等. 核级石墨断裂力学性能研究[J]. 核动力工程，2018，39(1)：79-83.
CHEN Hongniao，SU Qiliang，CHEN Jing，et al. Study on fracture properties of nuclear graphite[J]. Nuclear power engineering，2018，39(1)：79-83(in Chinese).

[3] 汪超洋，张振声，于溯源. 高温气冷堆石墨材料强度的评价[J]. 核动力工程，2001，22(4)：321-323.
WANG Chaoyang，ZHANG Zhensheng，YU Suyuan. Assessment of graphite strength in the HTR-10 structure[J]. Nuclear power engineering，2001，22(4)：321-323(in Chinese).

[4] 史力，王洪涛，王海涛，等. 核级石墨材料断裂韧性实验研究[J]. 核动力工程，2011，32(S1)：185-188.
SHI Li，WANG Hongtao，WANG Haitao，et al. Experimental study on fracture toughness of nuclear graphite[J]. Nuclear power engineering，2011，32(S1)：185-188(in Chinese).

[5] CHEN H H N，SU R K L，FOK S L，et al. Fracture behavior of nuclear graphite under three-point bending tests[J]. Engineering fracture mechanics，2017，186：143-157.

[6] 舒庆琏,佟景伟,杨楠,等.新型各向异性核工业石墨断裂力学行为的实验研究和数值分析[J].实验力学,2003,18(4):490-494.
SHU Qinglian,TONG Jingwei,YANG Nan,et al. DSCM experiment and analytical study for the fracture behavior of anisotropy nuclear graphite[J]. Journal of experimental mechanics,2003,18(4):490-494(in Chinese).

[7] 郭保桥,陈鹏万,谢惠民,等.虚位移场方法在石墨材料力学参数测量中的应用[J].实验力学,2011,26(5):565-572.
GUO Baoqiao,CHEN Pengwan,XIE Huimin,et al. Application of virtual displacement field for the mechanical property measurement of graphite material[J]. Journal of experimental mechanics,2011,26(5):565-572(in Chinese).

[8] TZELEPI A,RAMSAY P,STEER A G,et al. Measuring the fracture properties of irradiated reactor core graphite[J]. Journal of nuclear materials,2018,509:667-678.

[9] 余子昊,陈红鸟,唐宇翔,等.基于XFEM模拟的核级石墨断裂行为研究[J].应用力学学报,2021,38(3):1036-1043.
YU Zihao,CHEN Hongniao,TANG Yuxiang,et al. Study on fracture behaviors of nuclear graphite using XFEM simulation[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(3):1036-1043(in Chinese).

[10] BURCHELL T D. Nuclear graphite and radiation effects[M]//BUSCHOW K H J,CAHN R W,FLEMINGS M C,et al. Encyclopedia of Materials:Science and Technology. 2nd ed. Oxford:Elsevier,2001:6310-6319.

[11] 刘帅,郭广平,郝文峰,等.基于数字体相关方法的3D打印材料内部变形测量[J].材料工程,2020,48(10):176-183.
LIU Shuai,GUO Guangping,HAO Wenfeng,et al. Internal deformation measurement of 3D printing materials based on digital volume correlation method[J]. Journal of materials engineering,2020,48(10):176-183(in Chinese).

[12] MOSTAFAVI M,COLLINS D M,CAI B,et al. Yield behavior beneath hardness indentations in ductile metals,measured by three-dimensional computed X-ray tomography and digital volume correlation[J]. Acta materialia,2015,82:468-482.

[13] DE SOUZA M A M,PARDINI L C,BOTELHO E C,et al. X-ray tomography applied to the void/defect measurement of hybrid CFRC/SiC composites[J]. Materials research express,2019,6(4):045606.

[14] BAY B K,SMITH T S,FYHRIE D P,et al. Digital volume correlation:three-dimensional strain mapping using X-ray tomography[J]. Experimental mechanics,1999,39(3):217-226.

[15] WADE-ZHU J,KRISHNA R,BODEY A J,et al. 4D synchrotron X-ray microtomography of fracture in nuclear graphite after neutron irradiation and radiolytic oxidation[J]. Carbon,2020,168:230-244.

[16] MOSTAFAVI M,MCDONALD S A,MUMMERY P M,et al. Observation and quantification of three-dimensional crack propagation in poly-granular graphite[J]. Engineering fracture mechanics,2013,110:410-420.

[17] JANSSEN C. Specimen for fracture mechanics studies on glass[J]. Revue de physique appliquée,1977,12(5):803.

[18] HE M Y,TURNER M R,EVANS A G. Analysis of the double cleavage drilled compression specimen for interface fracture energy measurements over a range of mode mixities[J]. Acta metallurgica et materialia,1995,43(9):3453-3458.

[19] PALLARES G,PONSON L,GRIMALDI A,et al. Crack opening profile in DCDC specimen[J]. International journal of fracture,2009,156(1):11-20.

[20] LIU G Y,WANG L,YI Y N,et al. Inverse identification of graphite damage properties under complex stress states[J]. Materials & design,2019,183:108135.

[21] 吴佳宁,邢同振,宋义敏.基于DSCM-FEMU的岩石力学参数反演研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):350-355.
WU Jianing,XING Tongzhen,SONG Yimin. Rock mechanical parameter inversion based on DSCM-FEMU[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2021,17(2):350-355(in Chinese).

[22] BECKER T H,MARROW T J,TAIT R B. Damage,crack growth and fracture characteristics of nuclear grade graphite using the Double Torsion technique[J]. Journal of nuclear materials,2011,414(1):32-43.

[23] SHEN J,MARROW T J,SCOTSON D,et al. Combined evaluation of Young modulus and fracture toughness in small specimens of fine grained nuclear graphite using 3D image analysis[J]. Journal of nuclear materials,2022,563:153642.

[24] LU W,LI X W,WU X X,et al. Investigation on the oxidation behavior and multi-step reaction mechanism of nuclear graphite SNG742[J]. Journal of nuclear science and technology,2020,57(3):263-275.

[25] MARROW T J,LIU D,BARHLI S M,et al. In situ measurement of the strains within a mechanically loaded polygranular graphite[J]. Carbon,2016,96:285-302.

[26] JIN X C,WADE-ZHU J,CHEN Y,et al. Assessment of the fracture toughness of neutron-irradiated nuclear graphite by 3D analysis of the crack displacement field[J]. Carbon,2021,171:882-893.

(编辑 张璐)